

УДК 621.86-182.7

Синтез механизмов параллельной структуры с тремя степенями свободы, содержащих кинематические цепи, налагающие связи на движение выходного звена^{*}

Е.В. Диденко¹, В.Г. Певнев¹, А.А. Романов²¹ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»² ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Synthesis of parallel structure mechanisms with three degrees of freedom containing kinematic chains imposing links on the output link motion

E.V. Didenko¹, V.G. Pevnev¹, A.A. Romanov²¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Gubkin University — National University of Oil and Gas² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Механизмы параллельной структуры, в частности их плоские конфигурации с тремя степенями свободы, благодаря сочетанию высокой точности, жесткости и способности воспринимать значительные эксплуатационные нагрузки представляют собой одно из важных направлений современного машиностроения. Конструктивная особенность таких механизмов заключается в наличии нескольких кинематических цепей, соединяющих неподвижное основание с выходным звеном. Их приводные цепи обеспечивают управление движением, а ограничивающие кинематические цепи формируют требуемое число степеней свободы. Такое конструктивное решение позволяет перераспределять внешние нагрузки между звеньями, повышая общую устойчивость и динамическую эффективность механизма. Одним из направлений исследования таких механизмов остаются вопросы структурного синтеза их схем. Существующие методики ограничены частными случаями, требующими специализированных решений, что снижает возможность их применения. В системах роботизированной хирургии механизмы параллельной структуры служат для обеспечения высокой точности и стабильности движений инструментов. Ограничивающие кинематические цепи позволяют выполнять манипуляции в ограниченном операционном пространстве, исключая нежелательные смещения. Механизмы с тремя степенями свободы активно применяются в медицинских симуляторах, обеспечивая реалистичное воспроизведение движений для обучения хирургов. Предложен подход к синтезу структурных схем механизмов, состоящих из нескольких приводных и одной ограничивающей кинематических цепей. Полученные результаты позволяют синтезировать все возможные структурные схемы механизмов параллельной структуры с тремя степенями свободы в соответствии с заданными начальными условиями. В перспективе можно создать атласы структурных схем, которые автоматизируют процесс выбора конфигураций, повышая эффективность проектирования.

^{*} Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU 2024-0022.

EDN: UABATR, <https://elibrary/uabatr>

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, три степени свободы, кинематическая цепь, налагающие связи

Parallel structure mechanisms, particularly their planar configurations with three degrees of freedom (3-DOF), represent one of the key directions in modern mechanical engineering due to their combination of high precision, rigidity, and the ability to handle significant operational loads. A defining feature of these mechanisms is the presence of multiple kinematic chains connecting the fixed base to the output link. Actuating chains provide motion control, while constraining kinematic chains define the required degrees of freedom. This structural approach redistributes external loads across the links, enhancing the overall stability and dynamic efficiency of the mechanism. One of the important areas of research in such mechanisms is the structural synthesis of their configurations. Existing methodologies are often limited to specific cases, which restricts their applicability in fields requiring specialized solutions. In robotic surgery systems, such mechanisms are employed to ensure high precision and stability of instrument movements. Constraining kinematic chains enable manipulation within confined surgical spaces, eliminating undesired displacements. Additionally, 3-DOF mechanisms are actively used in medical simulators, providing realistic motion reproduction for training surgeons. This study proposes an approach to the synthesis of structural configurations that include one constraining and several actuating kinematic chains. Based on the results obtained, it is possible to synthesize all feasible structural configurations of parallel structure mechanisms with three degrees of freedom, tailored to specific initial conditions. Future prospects include the development of structural configuration atlases, which will automate the configuration selection process and improve design efficiency.

EDN: UABATR, <https://elibrary/uabatr>

Keywords: parallel structure mechanism, three degrees of freedom, kinematic chain, imposing connections

Благодаря уникальным кинематическим и динамическим характеристикам плоские механизмы параллельной структуры (МПС) получили широкое распространение в различных роботизированных устройствах. Эти механизмы представляют собой системы, в которых несколько кинематических цепей (КЦ) соединяют основание с выходным звеном (ВЗ), обеспечивая его движение в плоскости. Такие конструкции находят применение в задачах, где требуются высокая точность, жесткость и стабильность работы [1–12].

Широко известен МПС, который выполняет плоские движения, имея три степени свободы и три независимые КЦ [4, 5, 7, 8, 11–15]. Одним из основных достоинств плоских МПС является размещение всех приводных двигателей на неподвижной базе. Это позволяет существенно уменьшить массу подвижных звеньев, что минимизирует инерционные нагрузки и повышает общую динамическую эффективность.

Применение параллельных КЦ в плоских МПС также находит место в медицинских устройствах, таких как хирургические роботы [7, 11, 12]. В этих системах важно обеспечить минимальное инвазивное вмешательство, высокую

точность и контроль над движением инструмента. Механизмы с параллельными КЦ с тремя степенями свободы позволяют точно управлять положением и ориентацией инструментов в ограниченном пространстве операционного поля. Также КЦ в составе МПС накладывают ограничения на движение инструментов, что исключает возможность ошибок в позиционировании и снижает риск повреждения тканей.

Цель исследования — разработка метода структурного синтеза МПС с тремя степенями свободы, включающих в себя несколько приводных КЦ и одну ограничивающую КЦ, обеспечивающего получение полного множества допустимых структурных схем при заданных начальных условиях.

Рассмотрим МПС, в которых ВЗ соединено с основанием приводными КЦ и одной КЦ, налагающей связи на движение ВЗ. При отсутствии локальных внутренних подвижностей число связей

$$D = -6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5, \quad (1)$$

где n — число подвижных звеньев в КЦ; p_1, \dots, p_5 — число одно-, ..., пятиподвижных кинематических пар.

На основе структурной формулы (1) синтезированы МПС, состоящие из трех приводных КЦ и одной КЦ, налагающей число связей D на движение ВЗ.

Рассмотрим механизмы с тремя степенями свободы ($W = 3$), состоящие из девяти подвижных звеньев ($n = 9$), шести одноподвижных ($p_1 = 6$), трех двухподвижных ($p_2 = 3$) и трех трехподвижных ($p_3 = 3$) кинематических пар.

Для расчета числа степеней свободы синтезируемых МПС воспользуемся формулой Сомова — Малышева, записав ее как

$$W = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5. \quad (2)$$

После подстановки исходных данных для синтеза в формулу (2) получаем

$$W = 6 \cdot 9 - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 3 - 2 \cdot 0 - 0 = 3.$$

Тогда число возможных налагаемых связей на движение ВЗ

$$D = 6 - W = 6 - 3 = 3.$$

Следовательно, синтезированные МПС должны обладать тремя степенями свободы, а КЦ специального вида — накладывать три связи на движение ВЗ. Исходя из возможности реализации видов движения (поступательного или вращательного) в приводных КЦ, будем использовать только одноподвижные поступательные или вращательные кинематические пары.

Можно создать двести шестнадцать возможных МПС: двадцать семь МПС, реализующих три поступательных движения на ВЗ (xxx , $хху$, $ххz$, $хух$, $хуу$, $хуз$, $хzx$, $хзу$, $хzz$, $ухх$, $уху$, $ухz$, $уух$, $ууу$, $ууз$, $узх$, $узу$, $узз$, zxx , $zху$, $zхz$, $zух$, $зуу$, $зуz$, zzx , $zзу$, zzz); двадцать семь МПС, реализующих три вращательных движения на ВЗ ($\varphi_x\varphi_x\varphi_x$, $\varphi_x\varphi_x\varphi_y$, $\varphi_x\varphi_x\varphi_z$, $\varphi_x\varphi_y\varphi_x$, $\varphi_x\varphi_y\varphi_y$, $\varphi_x\varphi_y\varphi_z$, $\varphi_x\varphi_z\varphi_x$, $\varphi_x\varphi_z\varphi_y$, $\varphi_x\varphi_z\varphi_z$, $\varphi_y\varphi_x\varphi_x$, $\varphi_y\varphi_x\varphi_y$, $\varphi_y\varphi_x\varphi_z$, $\varphi_y\varphi_y\varphi_x$, $\varphi_y\varphi_y\varphi_y$, $\varphi_y\varphi_y\varphi_z$, $\varphi_y\varphi_z\varphi_x$, $\varphi_y\varphi_z\varphi_y$, $\varphi_y\varphi_z\varphi_z$, $\varphi_z\varphi_x\varphi_x$, $\varphi_z\varphi_x\varphi_y$, $\varphi_z\varphi_x\varphi_z$, $\varphi_z\varphi_y\varphi_x$, $\varphi_z\varphi_y\varphi_y$, $\varphi_z\varphi_y\varphi_z$, $\varphi_z\varphi_z\varphi_x$, $\varphi_z\varphi_z\varphi_y$, $\varphi_z\varphi_z\varphi_z$); восемьдесят один МПС, реализующий два поступательных и одно вращательное движения на ВЗ ($xx\varphi_x$, $хх\varphi_y$, $хх\varphi_z$, $ху\varphi_x$, $ху\varphi_y$, $ху\varphi_z$, $хz\varphi_x$, $хz\varphi_y$, $хz\varphi_z$, $ух\varphi_x$, $ух\varphi_y$, $ух\varphi_z$, $уу\varphi_x$, $уу\varphi_y$, $уу\varphi_z$, $уз\varphi_x$, $уз\varphi_y$, $уз\varphi_z$, $zx\varphi_x$, $zx\varphi_y$, $zx\varphi_z$, $зу\varphi_x$, $зу\varphi_y$, $зу\varphi_z$, $zz\varphi_x$, $zz\varphi_y$, $zz\varphi_z$, $x\varphi_xx$, $x\varphi_xy$, $x\varphi_xz$, $x\varphi_yx$, $x\varphi_yy$, $x\varphi_yz$, $x\varphi_zx$, $x\varphi_zy$, $x\varphi_zz$, $y\varphi_xx$, $y\varphi_xy$, $y\varphi_xz$, $y\varphi_yx$, $y\varphi_yy$, $y\varphi_yz$, $y\varphi_zx$, $y\varphi_zy$, $y\varphi_zz$, $z\varphi_xx$, $z\varphi_xy$, $z\varphi_xz$, $z\varphi_yx$, $z\varphi_yy$, $z\varphi_yz$, $z\varphi_zx$, $z\varphi_zy$, $z\varphi_zz$, φ_xxx , φ_xxy , φ_xxz , φ_xyx , φ_xyy , φ_xyz , φ_xzx , φ_xzy , φ_xzz , φ_yxx , φ_yxy , φ_yxz , φ_yyx , φ_yyy , φ_yyz , φ_yzx , φ_yzy , φ_yzz , φ_zxx , φ_zxy , φ_zxz ,

φ_zyx , φ_zyy , φ_zyz , φ_zzx , φ_zzy , φ_zzz); восемьдесят один механизм, реализующий два вращательных и одно поступательное движения на ВЗ ($x\varphi_x\varphi_x$, $x\varphi_x\varphi_y$, $x\varphi_x\varphi_z$, $x\varphi_y\varphi_x$, $x\varphi_y\varphi_y$, $x\varphi_y\varphi_z$, $x\varphi_z\varphi_x$, $x\varphi_z\varphi_y$, $x\varphi_z\varphi_z$, $y\varphi_x\varphi_x$, $y\varphi_x\varphi_y$, $y\varphi_x\varphi_z$, $y\varphi_y\varphi_x$, $y\varphi_y\varphi_y$, $y\varphi_y\varphi_z$, $y\varphi_z\varphi_x$, $y\varphi_z\varphi_y$, $y\varphi_z\varphi_z$, $z\varphi_x\varphi_x$, $z\varphi_x\varphi_y$, $z\varphi_x\varphi_z$, $z\varphi_y\varphi_x$, $z\varphi_y\varphi_y$, $z\varphi_y\varphi_z$, $z\varphi_z\varphi_x$, $z\varphi_z\varphi_y$, $z\varphi_z\varphi_z$, $\varphi_x\varphi_xx$, $\varphi_x\varphi_xy$, $\varphi_x\varphi_xz$, $\varphi_x\varphi_yx$, $\varphi_x\varphi_yy$, $\varphi_x\varphi_yz$, $\varphi_x\varphi_zx$, $\varphi_x\varphi_zy$, $\varphi_x\varphi_zz$, $\varphi_y\varphi_xx$, $\varphi_y\varphi_xy$, $\varphi_y\varphi_xz$, $\varphi_y\varphi_yx$, $\varphi_y\varphi_yy$, $\varphi_y\varphi_yz$, $\varphi_y\varphi_zx$, $\varphi_y\varphi_zy$, $\varphi_y\varphi_zz$, $\varphi_z\varphi_xx$, $\varphi_z\varphi_xy$, $\varphi_z\varphi_xz$, $\varphi_z\varphi_yx$, $\varphi_z\varphi_yy$, $\varphi_z\varphi_yz$, $\varphi_z\varphi_zx$, $\varphi_z\varphi_zy$, $\varphi_z\varphi_zz$, φ_xxx , φ_xxy , φ_xxz , φ_xyx , φ_xyy , φ_xyz , φ_xzx , φ_xzy , φ_xzz , φ_yxx , φ_yxy , φ_yxz , φ_yyx , φ_yyy , φ_yyz , φ_yzx , φ_yzy , φ_yzz , φ_zxx , φ_zxy , φ_zxz ,

Следует учесть, что при реализации нескольких поступательных движений, если они происходят на параллельных осях, уменьшается число степеней свободы ВЗ. Поскольку несколько звеньев будут двигаться как единое целое, МПС ($ххх$, $ууу$, zzz) будут иметь одну степень свободы ($W = 1$), а МПС ($хху$, $ххz$, $хуу$, $хzz$, $ухх$, $уух$, $ууз$, $узз$, zxx , $зуу$, zzx , $zзу$) — две ($W = 2$), что не соответствует условиям синтеза. Таким образом, при реализации трех поступательных движений можно создать только двенадцать механизмов с тремя степенями свободы ($W = 3$) ($хух$, $хуз$, $хzx$, $хзу$, $уху$, $ухz$, $узх$, $узу$, $zху$, $zхz$, $zух$, zyz).

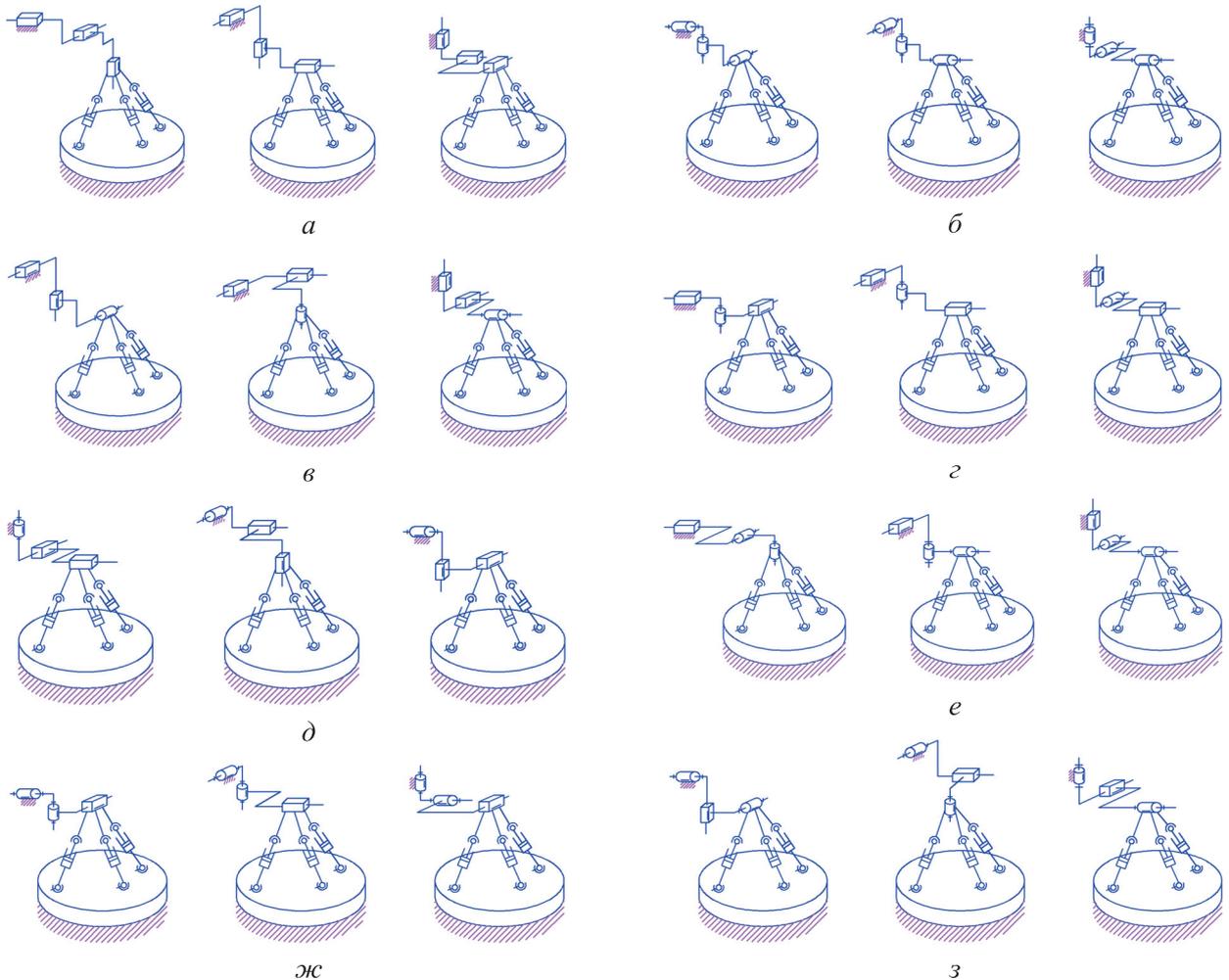
Возможные варианты полученных решений, разделенные на группы, в зависимости от вида движения, приведены в таблице, где В — звенья, совершающие вращательное движение, а П — поступательное.

Рассмотрим примеры некоторых синтезированных МПС реализующих следующие виды движения (рис. 1):

- три поступательных (ППП) с изменением координат ВЗ $хуз$, $узх$, $zху$ (рисунок, а);
- три вращательных (ВВВ) с изменением координат ВЗ $\varphi_x\varphi_z\varphi_y$, $\varphi_y\varphi_z\varphi_x$, $\varphi_z\varphi_y\varphi_x$ (рисунок, б);
- два поступательных и одно вращательное (ППВ) с изменением координат ВЗ $уз\varphi_y$, $ух\varphi_z$, $зу\varphi_x$ (рисунок, в);
- два поступательных и одно вращательное (ПВП) с изменением координат ВЗ $x\varphi_zy$, $y\varphi_zx$, $z\varphi_yx$ (рисунок, г);
- одно вращательное и два поступательных (ВПП) с изменением координат ВЗ φ_zyx , φ_yxz , φ_xzy (рисунок, д);
- одно поступательное и два вращательных (ПВВ) с изменением координат ВЗ $x\varphi_y\varphi_z$, $y\varphi_z\varphi_x$, $z\varphi_y\varphi_x$ (рисунок, е);

Возможные движения ВЗ для МПС с тремя степенями свободы

Вид движения	Координаты ВЗ
ППП	$xуx, хуz, хzх, хzу, уху, уxz, yzx, yzy, zxу, zхz, zyх, zyз$
ВВВ	$\varphi_x\varphi_x\varphi_x, \varphi_x\varphi_x\varphi_y, \varphi_x\varphi_x\varphi_z, \varphi_x\varphi_y\varphi_x, \varphi_x\varphi_y\varphi_y, \varphi_x\varphi_y\varphi_z, \varphi_x\varphi_z\varphi_x, \varphi_x\varphi_z\varphi_y, \varphi_x\varphi_z\varphi_z, \varphi_y\varphi_x\varphi_x, \varphi_y\varphi_x\varphi_y, \varphi_y\varphi_x\varphi_z, \varphi_y\varphi_y\varphi_x, \varphi_y\varphi_y\varphi_y, \varphi_y\varphi_y\varphi_z, \varphi_y\varphi_z\varphi_x, \varphi_y\varphi_z\varphi_y, \varphi_y\varphi_z\varphi_z, \varphi_z\varphi_x\varphi_x, \varphi_z\varphi_x\varphi_y, \varphi_z\varphi_x\varphi_z, \varphi_z\varphi_y\varphi_x, \varphi_z\varphi_y\varphi_y, \varphi_z\varphi_y\varphi_z, \varphi_z\varphi_z\varphi_x, \varphi_z\varphi_z\varphi_y, \varphi_z\varphi_z\varphi_z$
ППВ	$хх\varphi_x, хх\varphi_y, хх\varphi_z, ху\varphi_x, ху\varphi_y, ху\varphi_z, хz\varphi_x, хz\varphi_y, хz\varphi_z, ух\varphi_x, ух\varphi_y, ух\varphi_z, уу\varphi_x, уу\varphi_y, уу\varphi_z, yz\varphi_x, yz\varphi_y, yz\varphi_z, zx\varphi_x, zx\varphi_y, zx\varphi_z, zy\varphi_x, zy\varphi_y, zy\varphi_z, zz\varphi_x, zz\varphi_y, zz\varphi_z$
ПВП	$x\varphi_x x, x\varphi_x y, x\varphi_x z, x\varphi_y x, x\varphi_y y, x\varphi_y z, x\varphi_z x, x\varphi_z y, x\varphi_z z, y\varphi_x x, y\varphi_x y, y\varphi_x z, y\varphi_y x, y\varphi_y y, y\varphi_y z, y\varphi_z x, y\varphi_z y, y\varphi_z z, z\varphi_x x, z\varphi_x y, z\varphi_x z, z\varphi_y x, z\varphi_y y, z\varphi_y z, z\varphi_z x, z\varphi_z y, z\varphi_z z$
ВПП	$\varphi_x x x, \varphi_x x y, \varphi_x x z, \varphi_x y x, \varphi_x y y, \varphi_x y z, \varphi_x z x, \varphi_x z y, \varphi_x z z, \varphi_y x x, \varphi_y x y, \varphi_y x z, \varphi_y y x, \varphi_y y y, \varphi_y y z, \varphi_y z x, \varphi_y z y, \varphi_y z z, \varphi_z x x, \varphi_z x y, \varphi_z x z, \varphi_z y x, \varphi_z y y, \varphi_z y z, \varphi_z z x, \varphi_z z y, \varphi_z z z$
ПВВ	$x\varphi_x\varphi_x, x\varphi_x\varphi_y, x\varphi_x\varphi_z, x\varphi_y\varphi_x, x\varphi_y\varphi_y, x\varphi_y\varphi_z, x\varphi_z\varphi_x, x\varphi_z\varphi_y, x\varphi_z\varphi_z, y\varphi_x\varphi_x, y\varphi_x\varphi_y, y\varphi_x\varphi_z, y\varphi_y\varphi_x, y\varphi_y\varphi_y, y\varphi_y\varphi_z, y\varphi_z\varphi_x, y\varphi_z\varphi_y, y\varphi_z\varphi_z, z\varphi_x\varphi_x, z\varphi_x\varphi_y, z\varphi_x\varphi_z, z\varphi_y\varphi_x, z\varphi_y\varphi_y, z\varphi_y\varphi_z, z\varphi_z\varphi_x, z\varphi_z\varphi_y, z\varphi_z\varphi_z$
ВВП	$\varphi_x\varphi_x x, \varphi_x\varphi_x y, \varphi_x\varphi_x z, \varphi_x\varphi_y x, \varphi_x\varphi_y y, \varphi_x\varphi_y z, \varphi_x\varphi_z x, \varphi_x\varphi_z y, \varphi_x\varphi_z z, \varphi_y\varphi_x x, \varphi_y\varphi_x y, \varphi_y\varphi_x z, \varphi_y\varphi_y x, \varphi_y\varphi_y y, \varphi_y\varphi_y z, \varphi_y\varphi_z x, \varphi_y\varphi_z y, \varphi_y\varphi_z z, \varphi_z\varphi_x x, \varphi_z\varphi_x y, \varphi_z\varphi_x z, \varphi_z\varphi_y x, \varphi_z\varphi_y y, \varphi_z\varphi_y z, \varphi_z\varphi_z x, \varphi_z\varphi_z y, \varphi_z\varphi_z z$
ВПВ	$\varphi_x x\varphi_x, \varphi_x x\varphi_y, \varphi_x x\varphi_z, \varphi_x y\varphi_x, \varphi_x y\varphi_y, \varphi_x y\varphi_z, \varphi_x z\varphi_x, \varphi_x z\varphi_y, \varphi_x z\varphi_z, \varphi_y x\varphi_x, \varphi_y x\varphi_y, \varphi_y x\varphi_z, \varphi_y y\varphi_x, \varphi_y y\varphi_y, \varphi_y y\varphi_z, \varphi_y z\varphi_x, \varphi_y z\varphi_y, \varphi_y z\varphi_z, \varphi_z x\varphi_x, \varphi_z x\varphi_y, \varphi_z x\varphi_z, \varphi_z y\varphi_x, \varphi_z y\varphi_y, \varphi_z y\varphi_z, \varphi_z z\varphi_x, \varphi_z z\varphi_y, \varphi_z z\varphi_z$



Схемы синтезированных МПС с тремя степенями свободы, совершающих различные движения ВЗ:
 а — ППП; б — ВВВ; в — ППВ; г — ПВП; д — ВПП; е — ПВВ; ж — ВВП; з — ВПВ

- два вращательных и одно поступательное (ВВП) с изменением координат ВЗ $\varphi_x\varphi_zy$, $\varphi_y\varphi_zx$, $\varphi_z\varphi_xy$ (рисунок, ж);

- два вращательных и одно поступательное (ВПП) с изменением координат ВЗ $\varphi_xz\varphi_y$, $\varphi_yx\varphi_z$, $\varphi_zy\varphi_x$ (рисунок, з).

Синтезированные МПС представляют собой отдельное направление в проектировании, основным отличием которого является наличие в их составе специальной КЦ, накладывающей ограничения на движение ВЗ. Использование таких КЦ позволяет эффективно адаптировать МПС к выполнению узкоспециализированных задач, сохраняя при этом их жесткость, устойчивость и надежность.

Особую роль в проектировании таких МПС играет процесс синтеза структурных схем, включающий в себя системный поиск и анализ всех возможных комбинаций звеньев, соединений и КЦ, которые могут быть использованы для реализации заданных начальных условий. На основе этого анализа можно разработать оптимальные конфигурации МПС, соответствующие конкретным техническим требованиям, таким как число степеней свободы, область рабочего пространства и условия нагружения. Предложенный подход позволяет создавать атласы структурных схем, представляющие собой каталог возможных конфигураций МПС.

Создание атласов структурных схем и разработка методов синтеза позволяют ускорить

процесс проектирования МПС, повысить их надежность и соответствие требованиям конкретных задач. Таким образом, синтезированные МПС с КЦ, накладывающими ограничения на движение ВЗ, становятся незаменимым инструментом в проектировании высокоточных, динамически устойчивых и технологически эффективных систем.

Выводы

1. Выполнен систематический синтез МПС, состоящих из трех приводных и одной ограничивающей КЦ, обеспечивающих три степени свободы ВЗ.

2. Получено и классифицировано множество возможных структурных схем (216 удовлетворяют начальным условиям синтеза) МПС. Установлено, что с учетом условий параллельности поступательных перемещений часть комбинаций не удовлетворяет требованию трех степеней свободы, что позволило выделить реализуемые конфигурации с заданной подвижностью. Приведенные типовые структурные схемы могут служить основой для построения атласов МПС.

3. Показано, что включение в состав механизма специальной КЦ, налагающей связи на движение ВЗ, позволяет адаптировать структуру к решению специализированных задач при сохранении преимуществ МПС по жесткости и точности позиционирования.

Литература

- [1] Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 276 p.
- [2] Merlet J.-P. Parallel robots. *Springer*, 2006. 402 p.
- [3] Taghirad H. *Parallel robots. Mechanics and control*. CRC Press, 2013. 533 p.
- [4] Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *J. Mech. Des.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 617–624, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1667955>
- [5] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2004. 312 p.
- [6] Siciliano D., Khatib O., eds. Springer handbook of robotics. *Springer*, 2016. 2228 p.
- [7] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. XI World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2004, pp. 1624–1628.
- [8] Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [9] Masafumi O., ed. Advances in mechanism and machine science. *Proceedings of the 16th IFToMM World Congress*. Vol. 1. Springer, 2023. 1027 p.
- [10] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *Eur. J. Mech. A Solids*, 2004, vol. 23, no. 6, pp. 1021–1039, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2004.08.006>

- [11] Глазунов В.А., Ганиев Р.Ф., ред. *Механизмы параллельной структуры и их применение*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2018. 1035 с.
- [12] Глазунов В.А., Хейло С.В., ред. *Новые механизмы робототехнических и измерительных систем*. Москва, Техносфера, 2022. 244 с.
- [13] Глазунов В.А., Диденко Е.В., Левин С.В. и др. *Механизм параллельной структуры*. Патент РФ 179051. Заявл. 21.12.2017, опубл. 25.04.2018.
- [14] Laryushkin P., Glazunov V., Demidov S. Singularity analysis of 3-DOF translational parallel manipulator. In: *Advances on theory and practice of robots and manipulators*. Springer, 2014, pp. 47–54, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_6
- [15] Filippov G.S., Glazunov V.A., Terekhova A.A. et al. 3-DOF spherical parallel mechanism. In: *AIMEE 2019*. Springer, 2020, pp. 334–344, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39162-1_31

References

- [1] Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 276 p.
- [2] Merlet J.-P. *Parallel robots*. Springer, 2006. 402 p.
- [3] Taghirad H. *Parallel robots. Mechanics and control*. CRC Press, 2013. 533 p.
- [4] Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *J. Mech. Des.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 617–624, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1667955>
- [5] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer, 2004. 312 p.
- [6] Siciliano B., Khatib O., eds. *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016. 2228 p.
- [7] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. XI World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2004, pp. 1624–1628.
- [8] Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [9] Masafumi O., ed. *Advances in mechanism and machine science. Proceedings of the 16th IFToMM World Congress*. Vol. 1. Springer, 2023. 1027 p.
- [10] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *Eur. J. Mech. A Solids*, 2004, vol. 23, no. 6, pp. 1021–1039, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2004.08.006>
- [11] Glazunov V.A., Ganiev R.F., eds. *Mekhanizmy parallelnoy struktury i ikh primeneniye* [Mechanisms of parallel structure and their application]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2018. 1035 p. (In Russ.).
- [12] Glazunov V.A., Kheylo S.V., eds. *Novye mekhanizmy robototekhnicheskikh i izmeritelnykh system* [New mechanisms of robotics and measurement systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2022. 244 p. (In Russ.).
- [13] Glazunov V.A., Didenko E.V., Levin S.V. et al. *Mekhanizm parallelnoy struktury* [Mechanism of parallel structure]. Patent RU 179051. Appl. 21.12.2017, publ. 25.04.2018. (In Russ.).
- [14] Laryushkin P., Glazunov V., Demidov S. Singularity analysis of 3-DOF translational parallel manipulator. In: *Advances on theory and practice of robots and manipulators*. Springer, 2014, pp. 47–54, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_6
- [15] Filippov G.S., Glazunov V.A., Terekhova A.A. et al. 3-DOF spherical parallel mechanism. In: *AIMEE 2019*. Springer, 2020, pp. 334–344, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39162-1_31

Статья поступила в редакцию 14.02.2025

Информация об авторах

ДИДЕНКО Елена Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и технической механики. ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1, e-mail: didenkohv@gmail.com).

ПЕВНЕВ Виктор Григорьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и технической механики. ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1, e-mail: pevnev.v@gubkin.ru).

РОМАНОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Диденко Е.В., Певнев В.Г., Романов А.А. Синтез механизмов параллельной структуры с тремя степенями свободы, содержащих кинематические цепи, налагающие связи на движение выходного звена. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 20–26.

Please cite this article in English as:

Didenko E.V., Pevnev V.G., Romanov A.A. Synthesis of parallel structure mechanisms with three degrees of freedom containing kinematic chains imposing links on the output link motion. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 20–26.

Information about the authors

DIDENKO Elena Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Technical Mechanics. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Gubkin University — National University of Oil and Gas (119991, Moscow, Russian Federation, Leninsky Prospekt, Bldg. 65, Block 1, e-mail: didenkohv@gmail.com).

PEVNEV Viktor Grigorievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Technical Mechanics. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Gubkin University — National University of Oil and Gas (119991, Moscow, Russian Federation, Leninsky Prospekt, Bldg. 65, Block 1, e-mail: pevnev.v@gubkin.ru).

ROMANOV Andrey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher, Laboratory of Theory of Mechanisms and Structures of Machines. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).